

Abstrakt

Vavrla, Zdenek. *Vizualizace proudění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 31 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D..

Tato bakalářská práce pojednává o metodách vizualizace proudění tekutin a to ve vzduchu i ve vodě. Nejprve je uvedena stručná charakteristika základních pojmů souvisejících s prouděním tekutiny, jako je například proudnice, laminární a turbulentní proudění. Dále jsou uvedeny používané vizualizační metody, rozdělené podle určitých typů a použití pro kapalinu nebo plyn. Tyto metody poskytují kvalitativní pohled na proudění a umožňují vytvořit si přehled o vlastnostech proudění plynů nebo kapalin. Některé z těchto metod jsou jednoduché a některé jsou složitější. Na závěr je uveden popis realizovaného jednoduchého experimentu vizualizace proudění v kapalině za pomoci velmi výkonného laserového ukazovátka.

Klíčová slova: vizualizace proudění, proudnice, turbulentní proudění, laminární proudění

Abstract

Vavrla, Zdenek. *Flow visualization*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2011. 31 p. Thesis supervisor doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D..

This bachelor's thesis deals with fluid flow visualization methods in the air and water. First brief characteristic of the basic concepts of fluid flow is described, such as streamline, laminar and turbulent flow. The described visualization methods are divided into certain types and are used for fluid or gas. These methods provide a qualitative view of the flow and create the overview of the characteristics of gas or liquid flow. Some of these methods are simple and some are more complex. Finally, a simple experiment of liquids flow visualization is described by very powerful laser pointer.

Keywords: flow visualization, streamlines, turbulent flow, laminar flow

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana doc. Ing. Pavla Rudolfa, Ph.D. a s použitím uvedené literatury.

Brno, 2011

.....

Zdenek VAVRLA

Poděkování

Za účinnou podporu a pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování bakalářské práce tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Pavlovi Rudolfovi, Ph.D. Dále chci poděkovat Ing. Oldřichu Šperkovi za pomoc s fotografickou dokumentací, p. Bronislavu Kusému za výrobu přípravku na uchycení laserového ukazovátka, Bc. Jaroslavu Sůkalovi za zapůjčení laserového ukazovátka, Ing. Pavlu Zubíkovi, Ph.D. za zapůjčení válcové čočky a svým rodičům za podporu při studiu na vysoké škole.

Obsah

1 Úvod.....	7
2 Základní pojmy.....	8
3 Metody vizualizace založené na zavádění částic do proudící tekutiny.....	9
3.1 Zavádění látek tvořících souvislá vlákna do tekutin.....	9
3.1.1 Zavádění látek do objemu kapalin.....	9
3.1.1.1 Vizualizace proudění pomocí barviva.....	10
3.1.1.2 Vizualizace proudění směřováním různobarevných kapalin.....	10
3.1.1.3 Vizualizace proudění pomocí chemické reakce s účinkem světla.....	11
3.1.1.4 Vizualizace proudění pomocí elektrolýzy.....	11
3.1.2 Zavádění látek do objemu plynů.....	12
3.1.2.1 Vizualizace proudění pomocí plamene hořícího plynu.....	12
3.1.2.2 Vizualizace proudění pomocí kouře či mlhy (aerosolu).....	13
3.1.2.3 Vizualizace proudění pomocí jiskrových výbojů.....	14
3.1.2.4 Vizualizace proudění pomocí luminiscence.....	15
3.1.2.5 Vizualizace proudění pomocí nažhavených drátků a vyhřátých povrchů.....	15
3.2 Zavádění částic netvořících souvislá vlákna do tekutin.....	16
3.2.1 Zavádění částic do objemu kapalin.....	16
3.2.2 Zavádění částic na povrch kapalin.....	17
3.2.3 Zavádění částic do objemu plynů.....	18
3.2.3.1 Metoda zavádění pevných částic.....	18
3.2.3.2 Metoda zahřátého vzduchu.....	19
3.2.3.3 Niťové sondy.....	20
3.3 Metoda PIV.....	20
4 Vizualizace proudění sledováním upravených povrchů.....	22
4.1 Vizualizace proudění kapalin.....	22
4.1.1 Fyzikální metody pro vizualizaci proudění kapalin.....	22
4.1.2 Mechanické metody pro vizualizaci proudění kapalin.....	23
4.2 Vizualizace proudění plynů.....	23
4.2.1 Chemické metody pro vizualizaci proudění plynů.....	23
4.2.2 Fyzikální metody pro vizualizaci proudění plynů.....	24
4.2.2.1 Sublimační metody.....	24
4.2.2.2 Odpařovací metody.....	25
4.2.3 Mechanické metody pro vizualizaci proudění plynů.....	26
4.2.3.1 Metoda niťových sond.....	26
4.2.3.2 Metoda kapalinových filmů.....	26
4.2.3.3 Metoda prášková.....	27
5 Experiment.....	28
6 Závěr.....	30
7 Seznam použitých zdrojů.....	31

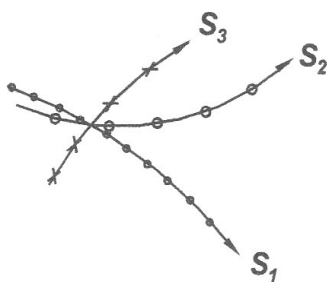
1 Úvod

V této práci jsou uvedeny vizualizační metody pro vizualizaci proudění v tekutinách. Tyto metody spadají pod experimentální mechaniku tekutin a jejich úkolem je poskytnout komplexní pohled na proudové pole. Význam těchto metod je v tom, že díky nim lze zviditelnit obraz proudění a utvořit si názor na jeho charakteristiky. Dále tyto metody umožňují (na základě zviditelnění proudění), sestavit fyzikální model dějů v proudění blízký skutečnosti, který je základem analýzy proudění. Dále slouží například k zjištění tvaru proudnic, obrazu obtékání těles, určování druhu proudění atd. Většinou se tyto metody používají ke studiu dvourozměrného proudění, ale díky rozvoji výpočetní techniky lze dnes využít i pro studium trojrozměrného proudění (například metoda PIV). Nejprve v této práci uvádím základní pojmy související s prouděním. Následně uvedené metody jsem rozdělil do několika skupin. Velkou skupinou jsou metody založené na zavádění částic do proudící tekutiny. Tyto částice musí mít jiné vlastnosti než proudící tekutina a mohou nebo nemusejí tvořit souvislá vlákna. Další velké skupiny jsou vizualizační metody založené na sledování upravených povrchů. Většinou se tyto metody realizují pomocí různých nátěrů nebo sond (například nitřová sonda). Nakonec jsem si vyzkoušel praktický experiment vizualizace proudění vody pomocí laserového ukazovátka.

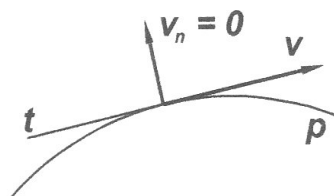
2 Základní pojmy

Pohyb tekutiny nazýváme tečením, tokem nebo nejčastěji prouděním. Proudění je ve skutečnosti vždy prostorové, ale v některých případech pro usnadnění řešení je považujeme za rovinné (dvourozměrné). V případech kdy převažuje jeden rozměr nad zbývajících dvěma, lze proudění považovat i za jednorozměrné (například proudění v potrubí).[6]

Proudění se sleduje v prostoru, rovině nebo po křivce a to sledováním určité částice kapaliny jako hmotného bodu nebo se sleduje celý proud v určitém časovém okamžiku. Dráha (trajektorie) je obvykle čarou, kterou probíhají částice tekutiny. Proudění lze rozdělit na ustálené a neustálené. Za ustáleného (stacionárního) proudění se trajektorie částic tekutiny nemění s časem. U neustáleného (nestacionárního) proudění mohou být trajektorie v každém časovém okamžiku odlišné (obr. 2-1).[7]

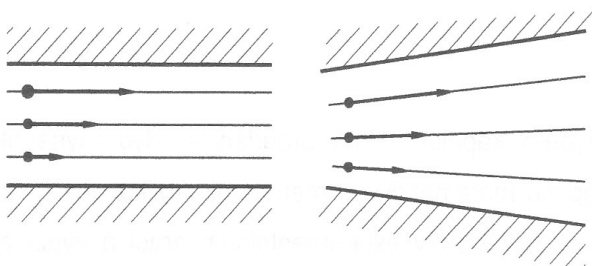


Obr. 2-1 Dráha částic při neustáleném proudění[7]

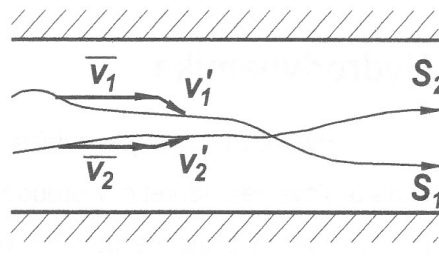


Obr. 2-2 Proudnice[7]

Proudnice (obr. 2-2) je obalová křivka vektorů rychlostí v jednotlivých bodech prostoru. Každým bodem proudící tekutiny prochází právě jedna proudnice. Proudnice se nemohou vzájemně protínat. Rychlost částice v libovolném místě proudu je tečnou k proudnici. U neustáleného proudění vytvářejí proudnice různé částice a nejsou totožné s trajektoriemi částic. U ustáleného proudění se nemění rychlost s časem, a proto mají proudnice stále stejný tvar a jsou totožné s trajektoriemi částic.[7,8]



Obr. 2-3 Laminární proudění[7]



Obr. 2-4 Turbulentní proudění[7]

Proudění se rozděluje na laminární proudění a turbulentní proudění. Laminární proudění se vyznačuje tím, že částice proudící tekutiny se pohybují ve vrstvách (deskách) a nepřemísťují se po průřezu (obr. 2-3). Naopak u turbulentního proudění je pohyb částic proudící tekutiny nepravidelný a neuspořádaný, částice se také přemísťují po průřezu. Uvnitř proudu dochází k vírům a míchání (obr. 2-4).[7,8]

3 Metody vizualizace založené na zavádění částic do proudící tekutiny

V metodách této skupiny se vizualizace dosahuje pomocí částic, které mají jiné vlastnosti než proudící tekutina. Tyto částice se zavádějí do proudu buď zvenku, nebo se získávají umělou změnou vlastností některých částic proudící tekutiny. Tyto částice mohou být jakéhokoli skupenství (plynného, kapalného nebo pevného). A jejich rozměr, tvar a hustotu je nutno volit tak, aby sledovaly místní tvar proudění (proudnice) a aby nebyl pozměňován základní charakter proudění sledované tekutiny. Tyto metody jsou vhodné pro vizualizaci proudění kapalin, plynů i pro vizualizaci dvoufázového proudění.[1]

Částice mohou v tekutině tvořit souvislá vlákna, souvislou oblast nebo mohou vcházet do proudu ojedinele. Při osvětlení proudu tekutiny jsou pak tyto částice viditelné v důsledku absorpce, rozptylu, odrazu nebo lomu světla a jejich pohyb může být pozorován okem nebo pomocí optických zařízení.[1]

Výsledkem vizualizace proudění sledováním látek či částic v tekutinách může být vždy kvalitativní posouzení proudění, ale také stanovení trajektorií částic tekutiny. Metody založené na zavádění látek do tekutiny tvořících souvislá vlákna umožňují navíc snadno určovat oblasti s laminárním či turbulentním prouděním, jelikož turbulence narušuje sledovaná vlákna.[2]

Metody založené na zavádění částic do tekutiny umožňují kromě možnosti kvalitativního posouzení a stanovení trajektorií měřit též rozložení rychlostí v tekutině, a to buď ze dvou či více snímků získaných při známé obrazové frekvenci, nebo také z jednoho snímku pořízeného při delší expozici. V prvním případě se rychlosti v tekutině určují z posuvu částic mezi jednotlivými snímky, ve druhém případě se rychlosti určují z délek stop, které zanechávají částice na snímcích při delší expozici. Díky rozvoji výpočetní techniky došlo k výraznému rozvoji vizualizačních metod založených na zavádění částic do tekutiny, a to doplněním vizualizačního zařízení o počítačové zpracování rozložení rychlostí v reálném čase. Takovou metodou je metoda označovaná jako PIV (Particle Image Velocimetry), která je v současné době vysoce efektivním nástrojem výzkumu proudění v oblasti mechaniky tekutin.[2]

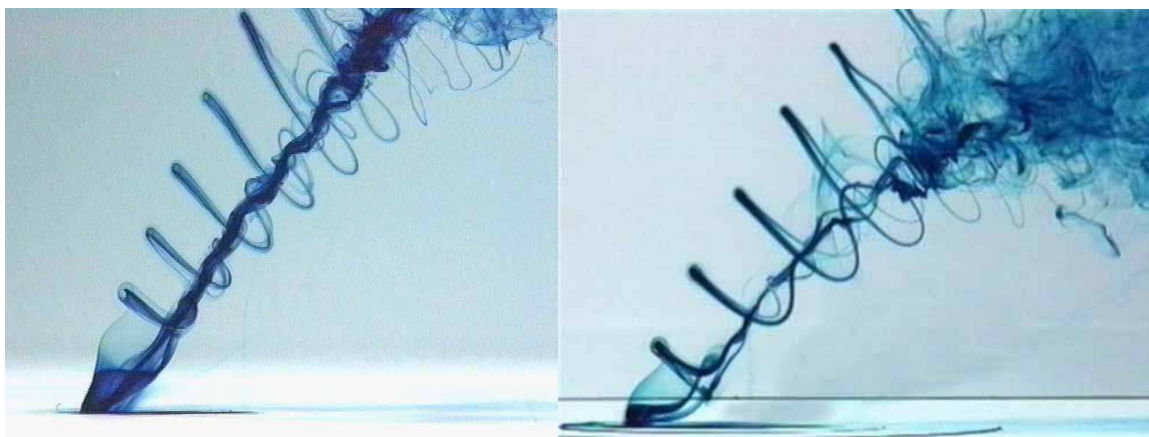
3.1 Zavádění látek tvořících souvislá vlákna do tekutin

3.1.1 Zavádění látek do objemu kapalin

Vizualizační metody založené na zavádění látek tvořících souvislá vlákna v kapalinách či metody založené na zavádění látek tvořících celé souvislé oblasti v kapalinách lze rozdělit do několika skupin. Jedná se o zviditelnění proudění pomocí barviva, směšováním různobarevných kapalin, zviditelnění proudění pomocí elektrolýzy a o zviditelnění proudění pomocí chemické reakce s účinkem světla. Experimentální zařízení se u těchto metod skládá obvykle z hydraulického kanálu či průhledného potrubí s osvětlovacím zařízením a záznamovým zařízením.[2]

3.1.1.1 Vizualizace proudění pomocí barviva

U této metody se k vytvoření barevných vláken hodí různé kapaliny (zejména barviva), zavedené do proudu tekutiny tenkými trubičkami – tryskami. Vhodnými barvivy jsou například: malachitová zeleň, methylenová modř s trochou Bismarkovy modře (obr. 3-1), fuchsin, indigo, methylenová violet, anilinové barvy (rozmíchané v alkoholu a zředěné vodou), dále také tuš, inkoust, vodní roztok manganistanu draselného, petrolej obarvený na černo beztukým nigrosinem.[1]



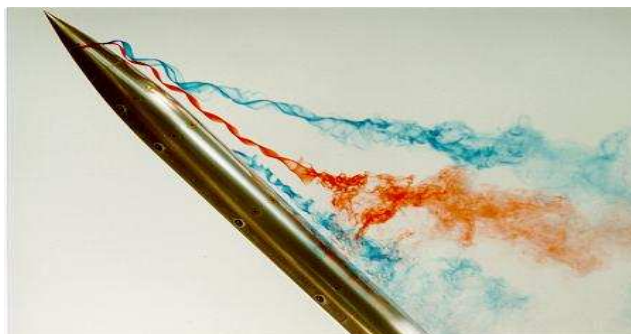
Obr. 3-1 Příklad vizualizace proudění pomocí barviva[3]

3.1.1.2 Vizualizace proudění směřováním různobarevných kapalin

Různobarevné kapaliny se, zavedeny do bezbarvé či barevné kapaliny, jejíž proudění sledujeme, mezi sebou a s proudící kapalinou při proudění navzájem mísí. Vznikající barevné odstíny pak charakterizují způsob jejich promíchání (obr. 3-2).

Pomocí různobarevných vláken, zaváděných do proudící tekutiny, lze sledovat i trojrozměrný proud.[1]

Vizualizace proudění s využitím různobarevných kapalin se s výhodou používá pro výzkum míchání, výzkum spojování proudů kapalin či výzkum šíření jedné kapaliny do druhé. Sleduje se přitom šíření barevných skvrn, nebo i změna barevných odstínů roztoku.[2]



Obr. 3-2 Příklad vizualizace proudění pomocí směšování barviva[3]

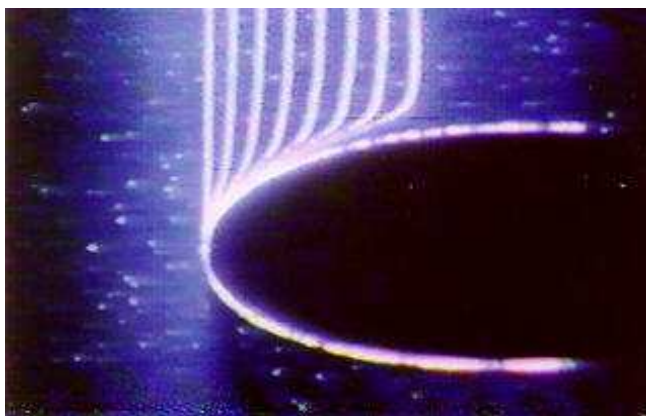
3.1.1.3 Vizualizace proudění pomocí chemické reakce s účinkem světla

U této metody se využívá chemická reakce projevující se změnou barvy proudícího roztoku účinkem světla. Původní roztok žlutozelené barvy se účinkem světelného záblesku silné intenzity zbarví v místě ozáření do modra. Tak je tedy možno získat v proudící kapalině oblasti (např. proužky) jiné barvy. Výhodou je, že není nutné narušovat proud vkládáním součástí, jimiž je barvivo do proudu zaváděno (např. trubičkami, dráty). Tímto způsobem je například velmi dobře možno sledovat vývoj rychlostního profilu nad obtékaným povrchem.[1]

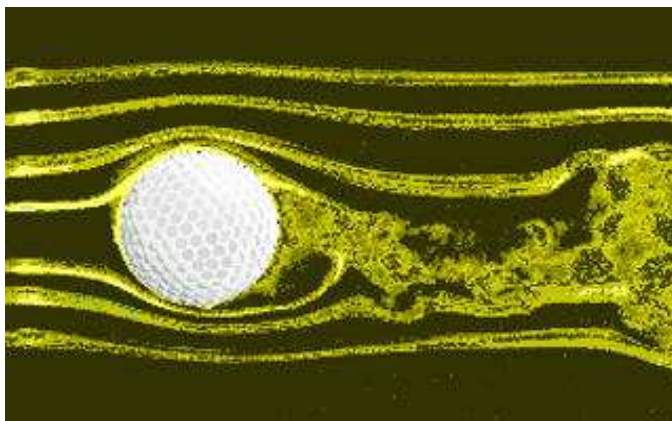
3.1.1.4 Vizualizace proudění pomocí elektrolýzy

Tato vizualizační metoda vytváří v kapalině s využitím elektrolýzy bublinky, které následně tvoří souvislá vlákna (obr. 3-3, obr. 3-4, obr. 3-5). Elektrody či více elektrod se umisťují buď ve volné kapalině, nebo na povrchu objektů. V některých případech může docházet i k chemické reakci mezi bublinkami a kapalinou, čímž vznikají lépe identifikovatelná barevná vlákna.[2]

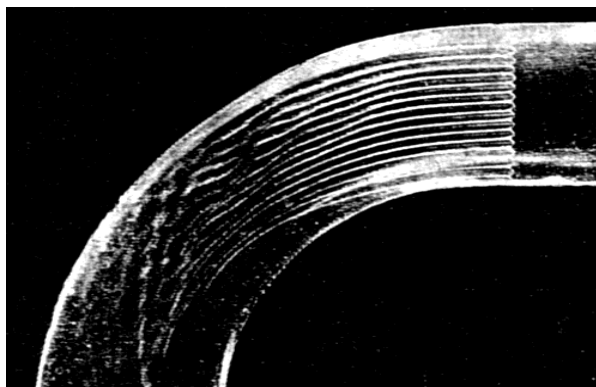
Zdrojem částic o jiných vlastnostech, než jaké má proudící kapalina (elektrolyt), je elektroda. Tato elektroda může být i součástí obtékaného tělesa. Proudící kapalina musí být vhodným elektrolytem, aby se při uzavření proudového okruhu mezi touto elektrodou a další elektrodou opačné polarity produkty elektrolýzy vylučovaly na elektrodě ve formě plynu (malých bublinek). Malé bublinky tohoto plynu jsou následně unášeny proudící kapalinou a vytváří tak žádaná vlákna. V některých případech mohou tyto produkty následkem sekundárních reakcí s elektrolytem získat barvu, která je odlišná od barvy elektrolytu, takže pak tvoří v proudícím elektrolytu barevné pruhy.[1]



Obr. 3-3 Vizualizace rychlostních profilů na povrchu křídla pomocí vodíkových bublinek periodicky zaváděných do kapaliny[2]



Obr. 3-4 Vizualizace proudnic při obtékání míčky pomocí vodíkových bublinek zaváděných do kapaliny. V oblasti turbulence za míčkem lze sledovat narušení vláken[2]



Obr. 3-5 Vizualizace proudění kolenem pomocí bublinek vodíku vznikajícího elektrolýzou vody. Proud směřuje zprava doleva[1]

3.1.2 Zavádění látek do objemu plynů

Tyto vizualizační metody založené na zavádění látek tvořících souvislá vlákna nebo celé souvislé oblasti v plynech lze rozdělit do několika druhů. Jedná se o zviditelnění proudění pomocí plamene hořícího plynu, vizualizace proudění pomocí kouře či mlhy (aerosolu), jiskrových výbojů, luminiscence a pomocí nažhavených drátků a vyhřátých povrchů.[1]

3.1.2.1 Vizualizace proudění pomocí plamene hořícího plynu

Při této metodě se do proudu vzduchu zavádějí soustavou tenkých trysek plameny hořícího plynu. Zavedené plameny musí mít malý průměr a velkou délku. Metoda se hodí pro zkoumání místní turbulence a lze ji také použít na zjišťování hranic úplavu, vloží-li se tryska do oblasti odtrženého proudění - úplavu.[1]

Plamen hořícího plynu se používá i jako sonda pro indikaci proudění vzduchu a ke zjišťování směru proudění vzduchu.[2]

3.1.2.2 Vizualizace proudění pomocí kouře či mlhy (aerosolu)

Při tomto způsobu vizualizace se do proudu vzduchu zavádí hřebenovou tryskou, jednoduchou tryskou nebo otvorem v obtékaném tělese souvislá vlákna kouře či mlhy (aerosolu), někdy však lze tyto trysky umístit i přímo na povrch zkoumaného objektu. Podmínkou je, aby aerosol vystupující z trysky měl stejnou rychlost jako okolní proudící prostředí. Rychlost proudu je také nutno volit tak, aby se vlákna aerosolu nerozplývala.[1]

Zdroje kouře nebo mlhy tvoří dvě základní skupiny:

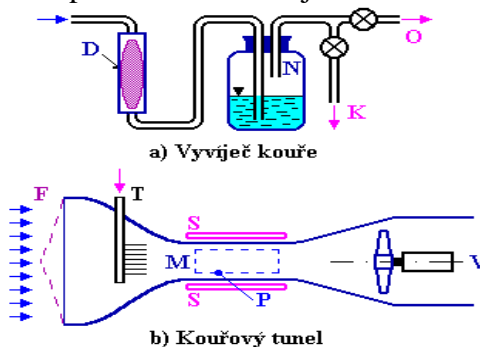
A) Kouř nebo mlha vzniká chemickou reakcí vhodné látky s proudícím prostředím. Jedním z těchto způsobů je použití dýmu tvořeného hygroskopickými solemi (např. chlorid cíničitý). Dým vzniká při sloučení této látky s vodními parami obsaženými ve vzduchu. Vzniklý kouř je bílý, hustý a snadno viditelný. Nevýhodou je vznikání nánosů na obtékaných tělesech. Další možností vzniku kouře nebo mlhy je reakce par kyseliny chlorovodíkové s parami amoniaku. U této metody je velkou nevýhodou korozivní účinek kouře a zdravotní závadnost.

B) Do proudícího prostředí se zavádí již vytvořený kouř nebo mlha, vzniklý chemickou reakcí nebo spalováním a odpařováním. Takovým zdrojem kouře může být např. zařízení uvedené na obr. 3-6a, zdrojem mlhy může být generátor mlhy používaný v divadlech či na diskotékách. Tyto přístroje lze doplnit i dávkovacím zařízením a speciálními koncovkami pro generování mlhy žádanou intenzitou a žádaným směrem.[1]

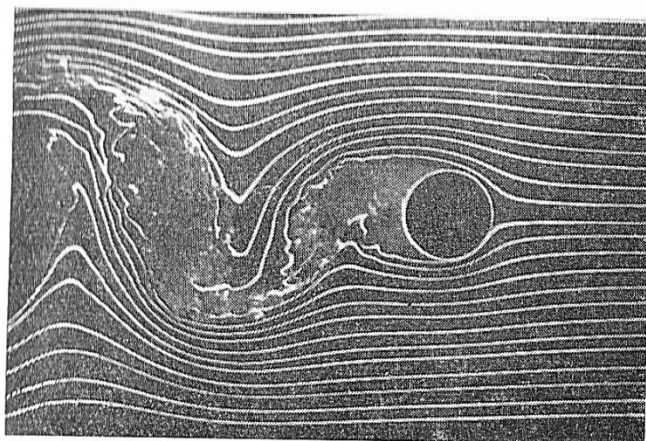
Zdrojem mlhy však může být i suchý led (slisované vločky CO_2 při teplotě -57°C), který po vložení do vody vytváří mlhu. Kouř či mlha může někdy vznikat i přímo v měřeném prostoru, a to vhodnou reakcí vzduchu s přiváděným plynem, nebo speciálně upraveným povrchem. Pára může ve vzduchu vznikat či zanikat i změnou tlaku.[1]

Vizualizace kouřem či mlhou se provádí obvykle ve speciálních tunelech, viz obr. 3-6b. Kouř se v těchto tunelech vytváří například odkapáváním horké látky (např. oleje) z trysky na rozžhavený odporový drát. Kouřové tunely se liší od aerodynamických především velkým poměrem zúžení v konfuzoru (až 1:48) a zařízením pro snížení turbulence na vstupu do tunelu. Bývají otevřené (kouř či mlhu je třeba odvádět) a pro malé rychlosti se stavějí ve svislé poloze, aby gravitace neovlivňovala generovaná vlákna. Metoda zviditelnění proudění pomocí kouře či mlhy se hodí pro zkoumání místní turbulence a lze ji aplikovat také na zjišťování hranic úplavu.[2]

Zviditelnění proudění touto metodou se provádí často také ve volném prostoru. Zdroj kouře či mlhy slouží pak jako sonda pro indikaci proudění vzduchu, ke zjišťování směru proudění vzduchu a ke zjišťování tvaru proudového pole. Kouř či mlha může být někdy i přímou součástí proudícího plynu a ze získaných obrazů lze studovat tvary proudů případně i další parametry. Příklad vizualizace proudění v tunelu je na obr. 3-7.[2]



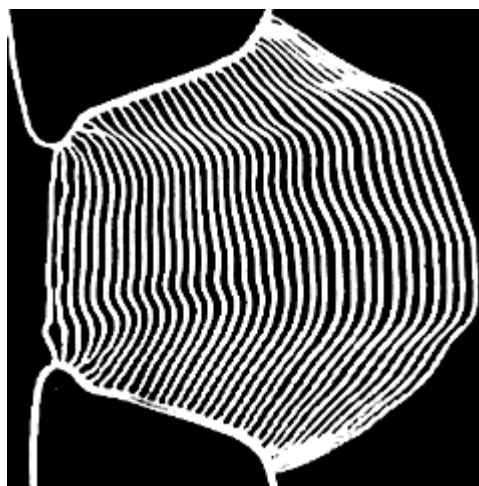
Obr. 3-6 Zařízení pro zviditelnění proudění pomocí kouře (D doutnák napuštěný olejem, N nádoba pro filtraci kouře, K přívod ke kouřovým tryskám, O obtok, T kouřové trysky, F filtr, M plochý měřicí prostor, P průzor, V ventilátor, S osvětlení)[2]



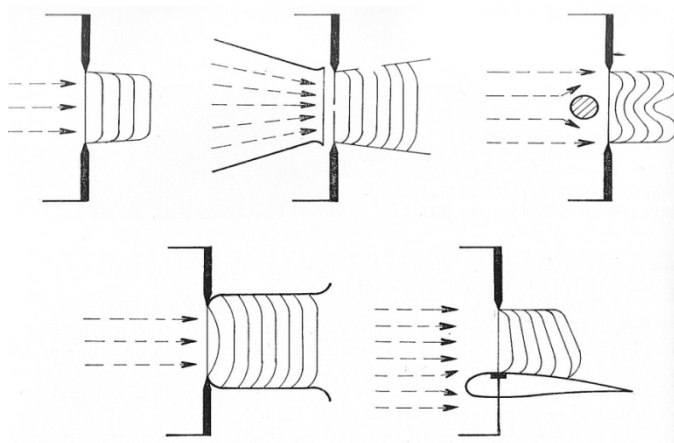
Obr. 3-7 Zviditelnění proudění v kouřovém tunelu[1]

3.1.2.3 Vizualizace proudění pomocí jiskrových výbojů

Další metodou vizualizace je zviditelnění pomocí jiskrových výbojů. Příkladem může být vizualizace proudění v rozšiřující se části vzduchového potrubí, viz obr. 3-8. Na elektrody vložené do proudícího vzduchu (obr. 3-9) se periodicky přivádějí krátké elektrické impulsy (asi 60 kV s dobou trvání řádově 10^{-6} s), čímž vznikne postupně řada elektrických výbojů krátkého trvání unášených proudem vzduchu. Následující svítící jiskrové výboje, opakující se v krátkých časových intervalech, můžeme následně přímo pozorovat. Při známé frekvenci impulsů lze ze získaného obrazu vyhodnotit i rychlosti proudění vzduchu. [1,2]



Obr. 3-8 Zviditelnění proudění v rozšiřující se části vzduchového potrubí pomocí jiskrových výbojů[1]



Obr. 3-9 Schéma uspořádání elektrod[1]

3.1.2.4 Vizualizace proudění pomocí luminiscence

Tato metoda se provádí při velmi nízkých tlacích. Atomy plynu se vybudí silnými vysokofrekvenčním střídavým elektrickým polem ještě před vstupem do trysky. Následně při výstupu tryskou (při vstupu do prostředí s nižším tlakem) září. Přímo vyznačují tvar proudu a rozdílnými intenzitami i tlakové rozdíly v proudu.[1]

Luminiscenci lze použít například v tunelech pro sledování proudění vzduchu a dusíku při nízkých tlacích. Také se hodí pro vizualizaci nadzvukového proudění.[1]

3.1.2.5 Vizualizace proudění pomocí nažhavených drátků a vyhřátých povrchů

U této metody se používá drát nažhavený elektrickým odporem, vytvoří se tak vrstva prostředí (vzduchu), která má jinou teplotu a hustotu než okolní části proudícího prostředí. Při vhodném osvětlení vznikne na stínítku tmavší proužek, znázorňující proudnici. Můžeme použít i několik drátů, umístěných rovnoběžně nad sebou napříč proudícím prostředím, což umožňuje vizualizaci systému proudnic.[1]

Výhody této metody jsou především jednoduchost zařízení, malá doba přípravy metody, není nutné do proudu zavádět další látky (neovlivníme druh proudění) a lze ji použít i pro třírozměrné proudění.[1]

Nevýhody této metody spočívá v tom, že nelze podrobně sledovat víření za obtékaným předmětem (vlivem víření se vlákna teplého vzduchu rychle rozplývají).[1]

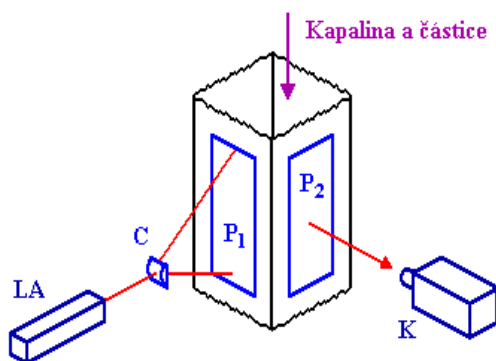
3.2 Zavádění částic netvořících souvislá vlákna do tekutin

3.2.1 Zavádění částic do objemu kapalin

Zavádění částic do sledovaného objemu kapalin je velmi rozšířenou vizualizační metodou pro zviditelnění proudění kapalin. Zavádíme-li do proudu sledované kapaliny ojedinělé částice, musejí mít přibližně stejnou specifickou hmotu jako sledovaná proudící kapalina. K vizualizaci se používají dřevěné piliny, drobné kousky slídy, jemný kovový prach nebo hliníkový prach. Tento prach se vmíchá do sledované kapaliny. Následně se na tyto částičky prachu zachycují bublinky vzduchu. Dále lze použít malé ztuhlé kapičky polystyrenu nebo drobné olejové kapičky. Vhodné jsou i malé vzduchové bublinky, které lze do sledované kapaliny zavádět dvojím způsobem- zaprvé vzduch se fouká malými otvory do blízkosti obtékaného tělesa. Zadruhé proudící voda vstupuje do pozorovacího prostoru z uzavřeného rezervoáru, kde se vývěvou udržuje nízký tlak vzduchu, díky tomu je prostoupěna velmi jemnými bublinkami vzduchu uvolněného z vody.[1]

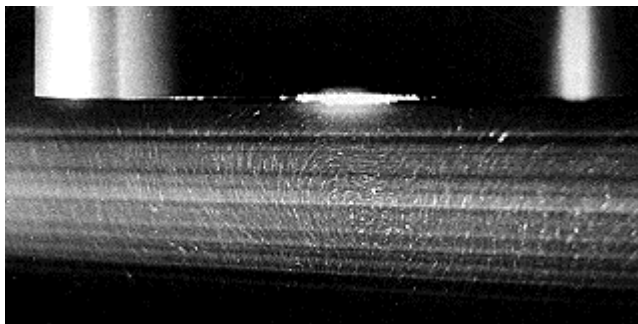
Tato metoda se používá především pro výzkum dvojrozměrného proudění v jednom zvoleném řezu, a to na skutečném zařízení s okénky nebo častěji v modelovém provedení. Při pozorování v reálném čase nebo z videozáznamů lze sledovat trajektorie proudu.[2]

Na obr. 3-10 je zobrazeno uspořádání experimentu pro vizualizaci proudění touto metodou. Experiment se skládá z osvětlovacího zařízení, kterým nejčastěji bývá laser s válcovou čočkou a ze záznamového zařízení, kterým může být kamera nebo fotoaparát. Osvětlovací zařízení a záznamové zařízení jsou umístěné u průzorů do prostoru s kapalinou. Při vizualizaci dvojrozměrného proudění vytváří osvětlovací zařízení tzv. světelný nůž (světelnou rovinu či plochý svazek paprsků), který osvětlí jen částice nacházející se ve zvoleném řezu (o definované tloušťce). Starší zařízení používaly k osvětlování pozorovaných prostor svazek paprsků vycházejících ze štěrbinu osvětlenou žárovkou nebo výbojkou. Při záznamu obrazu fotoaparátem je třeba volit vhodnou definovanou expozici, aby částice na získaných obrázcích vytvářely požadované trajektorie. Z velikostí světelných stop částic a expoziční doby lze stanovit rychlost částice v daném místě kapaliny. Rychlost je však možné stanovit i ze záznamu dvou či více snímků se známou obrazovou frekvencí, což lze využít především při počítačovém vyhodnocení záznamů. Vždy je však třeba dbát na to, aby zaváděné částice sledovaly proudnice a neovlivňovaly proudění.[1,2]



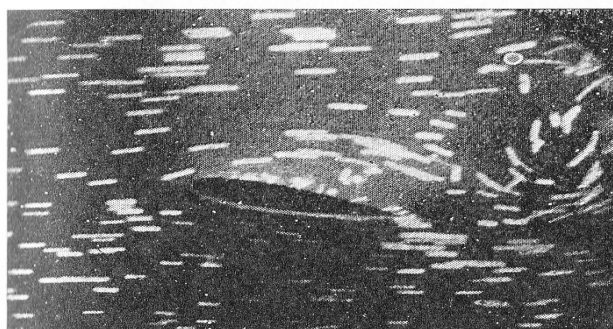
Obr. 3-10 Sestava pro vizualizaci proudění zaváděním částic do objemu kapaliny (LA laser, C válcová čočka vytvářející světelný nůž, K kamera, P_1 , P_2 průzory)[2]

Příklad zviditelnění trajektorií bublinek při proudění pod čelem disku rotujícím ve vodě je uveden na obr. 3-11. Jedná se o bublinky, které se vyskytují ve vodě běžně po jejím napuštění. Jelikož jde o proudění v omezeném prostoru, je vír pod diskem nesymetrický. Zároveň lze uprostřed disku (v místě malých rychlostí) pozorovat shluk bublinek ulpívajících na povrchu disku.[2]



Obr. 3-11 Vizualizace trajektorií bublinek při proudění pod diskem rotujícím ve vodě[2]

Příklad vizualizace proudění při obtékání profilu v hydraulickém tunelu pomocí ztuhlých kapiček polystyrenu je uveden na obr. 3-12.



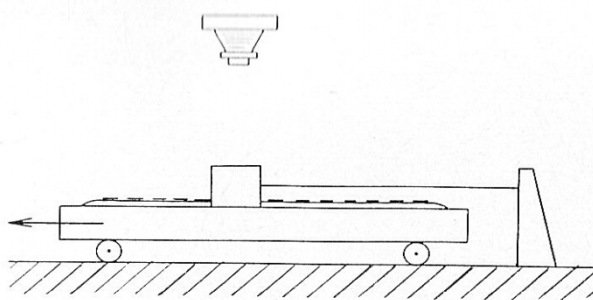
Obr. 3-12 Vizualizace obtékání profilu v hydraulickém tunelu pomocí ztuhlých kapiček polystyrenu o průměru 0,5 až 2 mm[1]

3.2.2 Zavádění částic na povrch kapalin

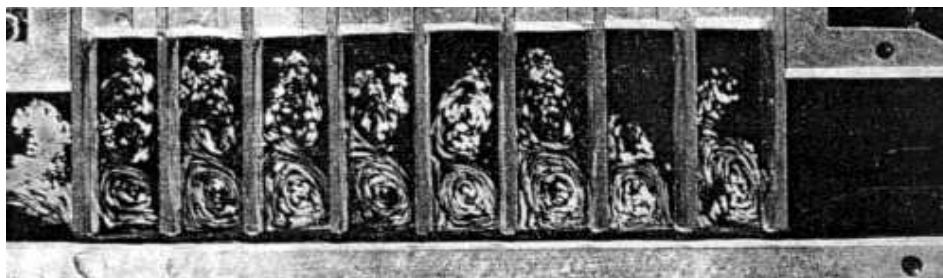
Zavádění ojedinělých částic na povrch kapaliny je hojně využívanou metodou. Při této metodě se povrch kapaliny posype například hliníkovými pilinami, prachem z balzového dřeva nebo lycopodiem, což jsou výtrusy plavuně - světle žlutý prášek s rozměrem zrn okolo 0,04 mm. Pro vizualizaci se používá kanál nebo koryto naplněné vodou. Při pohybu modelu původně klidnou hladinou pak částice dodané na povrch kapaliny, vytvoří na jejím povrchu obraz proudění.[1]

Metoda zavádění částic na povrch kapaliny umožňuje rovněž vizualizaci dvojrozměrného proudění, a to na speciálně vyrobených modelech. Příkladem takového modelu může být zařízení, jehož součástí je koryto (nádrž) obdélníkového tvaru. Na horních okrajích nádrže jsou připevněny kolejničky, po kterých pojíždí vozíček poháněný elektromotorem. Na horní část vozíčku je upevněna kamera nebo fotoaparát umožňující záznam obrazu, dolní část vozíčku nese model. Vizualizace se provádí posypáním povrchu kapaliny například lycopodiem.[1]

Jinou variantou vizualizace proudění pomocí částic na povrchu kapaliny může být metoda zobrazená na obr. 3-13. Na vozíčku je relativně tenká vrstva kapaliny posypaná vizualizačním práškem. Sledovaný model je uchycen k nepohyblivé podložce a při pohybu vozíku dojde k jeho obtékání, což lze zaznamenávat pevně uchyceným fotoaparátem. Příklad vizualizace proudění v komůrkách labyrintové ucpávky pomocí lycopodia na povrchu kapaliny je uveden na obr. 3-14. Obrázek umožňuje kvalitativní posouzení proudění a ukazuje charakteristické víry v jednotlivých komůrkách labyrintové ucpávky.[2]



Obr. 3-13 Schéma zařízení pro vizualizaci částic na hladině[1]



Obr. 3-14 Vizualizace proudění v komůrkách labyrintové ucpávky pomocí lycopodia na hladině[1]

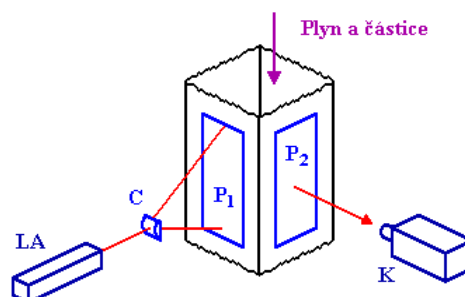
3.2.3 Zavádění částic do objemu plynů

Velmi známými metodami vizualizace proudění plynů jsou metody zavádění částic do celého objemu plynu. Mezi tyto metody patří metoda zavádění ojedinelých částic, metoda zahřátého vzduchu a nitřové sondy.

3.2.3.1 Metoda zavádění pevných částic

Při této metodě vizualizace proudění plynů se pro menší rychlosti hodí do proudu zavádět hliníkový prach nebo jemný prach z balzy. Tyto dva způsoby jsou nejpoužívanější, ale lze použít například prach kovový. Dalšími vhodnými částicemi jsou jiskry, které se hodí i na větší rychlosti. Používá se jisker získaných z uhelného prachu nebo obrušováním na brusném kotouči.[1]

Pro měření se dá využít zařízení uvedené na obr. 3-15. Zařízení se skládá z osvětlovacího zařízení, které bývá nejčastěji laser s válcovou čočkou a ze záznamového zařízení, kterým může být kamera nebo fotoaparát. Osvětlovací zařízení a záznamové zařízení jsou umístěné u průzorů do měřicího prostoru s plynem. Při vizualizaci dvojrozměrného proudění vytváří osvětlovací zařízení tzv. světelný nůž, který osvětlí jen částice nacházející se ve zvoleném řezu. Starší zařízení používaly k osvětlování pozorovaných prostor svazek paprsků vycházejících ze štěrbin osvětlenou žárovkou nebo výbojkou. Fotografováním lze zjistit trajektorie osvětlených částic a ze známé doby expozice a z délek trajektorií částic se dá vypočíst rychlost proudění. Rychlost je možné stanovit i ze záznamu dvou či více snímků se známou obrazovou frekvencí, což lze využít především při počítačovém vyhodnocení záznam. Zaváděné částice musí sledovat proudnice a musí mít velmi malou pádovou rychlost.[2]



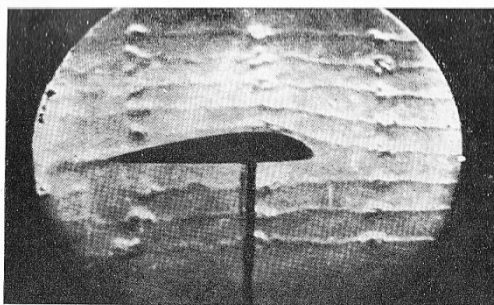
Obr. 3-15 Sestava pro vizualizaci proudění zaváděním pevných částic do objemu plynů (LA laser, C válcová čočka vytvářející světelný nůž, K kamera, P_1 , P_2 průzory)[2]

Mezi vizualizační metody se zaváděním pevných částic do objemu plynů lze řadit také vizualizaci dvoufázového proudění, kdy je zkoumán tvar proudu kapiček z rozprašovače, či tvar proudu kapiček z různých trysek. Pro zjišťování tvaru proudů není často nutné ani speciální osvětlení světelným nožem, ale stačí pouze proud vhodně nasvětlit.[2]

3.2.3.2 Metoda zahřátého vzduchu

Tato metoda využívá k vizualizaci proudění toho, že elektrickou jiskrou zahřátý malý objem proudícího vzduchu má jiné vlastnosti, než okolní nezahřáté prostředí. Při realizaci této metody dochází na několika jiskřištích k opakovaným elektrickým výbojům. Spojnice elektrod jiskřiště je kolmá k rovině proudu. Od každé dvojice elektrod tvořících jedno jiskřiště, postupuje řada malých zahřátých objemů proudícího plynu. Protože je těchto jiskřišť více, vzniká celá soustava takových řad. Je-li proudění stacionární, lze získat obrazy proudnic (obr. 3-16). Dále je možno ze vzdálenosti zahřátých objemů vzduchu určovat místní rychlost proudění. Jiskry mohou být například vyvolány pomocí indukční cívky a přerušovače.[1]

Tuto metodu lze realizovat například pomocí tunelu podobného kouřovému tunelu. Průzory musí být uspořádány tak, aby měřicím prostorem mohl procházet svazek paralelních světelných paprsků. Místo soustavy kouřových trysek musí být tunel vybaven dvojicemi elektrod, které generují v pravidelných intervalech jiskrové výboje. Od každé dvojice elektrod postupuje pak řada zahřátých objemů proudícího plynu, spojených tenkými vlákny plynu, a to následkem tepelné setrvačnosti elektrod.[2]

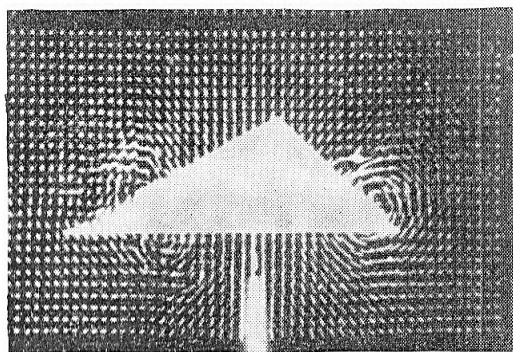
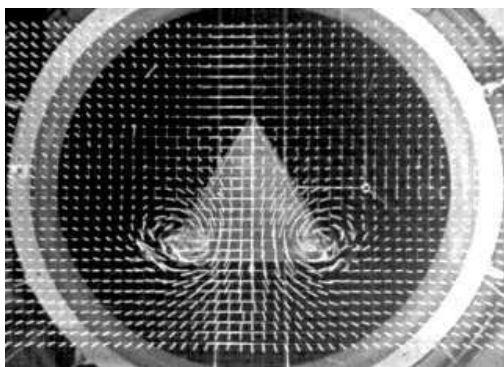


Obr. 3-16 Vizualizace obtékání křídla pomocí metody zahřátého vzduchu[1]

3.2.3 Nit'ové sondy

Použití nit'ové sondy je velmi používanou a jednoduchou metodou vizualizace proudění plynů. Sondou může být například tyčinka, na níž je ve stejných vzdálenostech upevněno několik nití. Konce nití bývají často roztřepené. Vloží-li se taková sonda do proudu, pak z orientace nití je možno posuzovat tvar trajektorie částic okolního proudícího plynu. Pomocí této sondy se dá zjistit i charakter obtékání tělesa, vloží-li se sonda do jeho těsné blízkosti.[1]

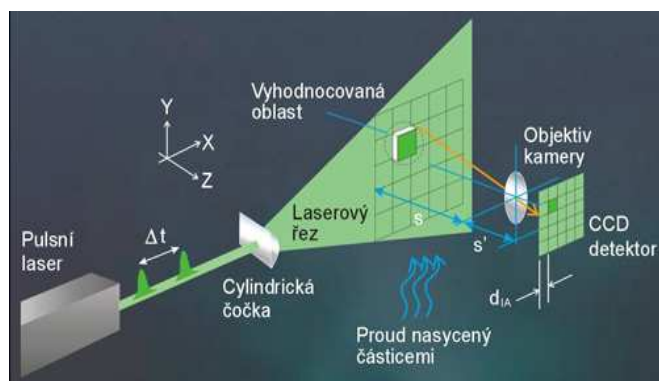
Nejčastěji při této metodě používáme pravouhlou drátěnou mříž, kde v místě křížení se upevní nitě. Umístíme-li mříž za obtékané těleso kolmo na směr proudu, lze na základě orientace nití na síti zkoumat proudění v úplavu za tělesem (obr. 3-17). Síť (s otvorem) je také možno navléci na obtékané těleso a pomocí nití zviditelnit oblast, ve které je proudění ovlivněno přítomností obtékaného tělesa. Toto zkoumání lze provádět i v příčných řezech okolo obtékaného tělesa.[2]



Obr. 3-17 Vizualizace vírů v úplavu za skloněným delta - křídlem pomocí sítě nití[1,2]

3.3 Metoda PIV

Metoda PIV (Particle Image Velocimetry) patří mezi moderní vizualizační a měřicí metody pro výzkum proudění tekutin (kapalin a plynů) v laboratorních i provozních podmínkách. V principu jde o vizualizaci proudění zaváděním částic do tekutiny a následné zpracování obrazu pomocí počítače s cílem získat vektorovou mapu rychlostí proudového pole. Zavedení počítačové podpory a zpracování obrazů částic v proudící tekutině vedlo k podstatnému rozšíření praktického uplatnění původních vizualizačních metod.[2]

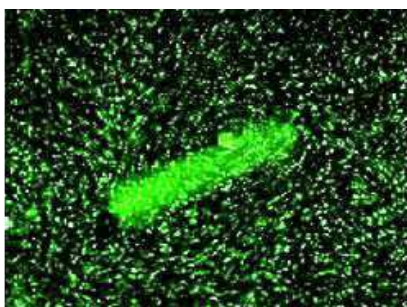


Obr. 3-18 Schéma zařízení pro metodu PIV[4]

Zařízení pro metodu PIV je relativně drahé a na trh se dodává v různých variantách. Příkladem může být zařízení schematicky znázorněné na obr. 3-18. Rovina měřicího prostoru je prosvěcována úzkým intenzivním laserovým pulzním nebo pulzujícím paprskem vedeným optickým vláknem. Tento paprsek je válcovou čočkou upraven do tvaru světelného nože. Do tohoto měřeného prostoru jsou vypouštěny mikroskopické částice. Optické vlákno usnadňuje manipulaci s osvětlovacím zařízením v méně přístupných prostorách. Pro osvětlení celého trojrozměrného prostoru lze nahradit válcovou čočku obyčejnou čočkou s kulovým povrchem.

Osvětlená rovina měřicího prostoru je ohraničena zorným polem záznamového zařízení umístěného kolmo na rovinu světelného nože. Pro možnost počítačového zpracování měření se pro záznam obrazů používá CCD kamera napojená přes digitalizační kartu k počítači. Místo kamery lze použít i fotoaparát, jehož obrazy je nutné dodatečně digitalizovat a pak rovněž zpracovat počítačem. Použití fotoaparátu je pracné, ale umožňuje získat obrazy s větším rozlišením. Pro zpracování obrazů je v počítači instalován speciální PIV procesor, ze kterého se získají data pro vektorovou mapu rychlostního pole z jednoho měření.[2,4]

Výsledkem aplikace metody PIV jsou jednak obrazy z vizualizace pohybujících se částic (obr. 3-19), ale především je možné získat v reálném čase vektorovou mapu rychlostí. Procesor pro zpracování dat může také generovat barevnou mapu rozložení rychlostí, čáry konstantních rychlostí a umožňuje různé úpravy výsledných dat pro prezentaci.[2,4]



Obr. 3-19 Vizualizace částic ve víru tekutiny[2]

Výhodami této metody je například: Do proudu sledované tekutiny se nemusí vkládat žádné sondy nebo jiné zařízení rušící sledované proudění. Jsme schopni měřit 2D i 3D proudění. Lze měřit rychlosti od nulových po nadzvukové.

Nevýhodou této metody je vysoká pořizovací cena.[5]

4 Vizualizace proudění sledováním upravených povrchů

Další velkou skupinou vizualizačních metod proudění tekutin je zviditelnění proudění sledováním upravených povrchů. U těchto metod se vizualizace dosahuje vhodnou úpravou povrchu obtékaných těles. Při obtékání těles se sleduje působení tekutiny na povrch. Následně z tohoto působení lze určit charakter proudění tekutiny u povrchu nebo někdy i za tělesem v úplavu. Cílem vizualizace je obvykle kvalitativní posouzení proudění kolem povrchů, sledování trajektorií proudů obtékajících povrch, nebo alespoň určení oblastí s laminárním či turbulentním prouděním. Tyto metody jsou vhodné pro vizualizaci proudění kapalin i pro vizualizaci proudění plynů.[1,2]

Metody založené na uvedeném principu lze rozdělit na tři skupiny:

- a) Chemické metody - využívá se chemické reakce proudící tekutiny s vhodnou látkou, nanesenou v tenké vrstvě na povrch obtékaného tělesa. Místa na povrchu obtékaného tělesa, kde probíhá chemická reakce, získají jejím vlivem jiný barevný odstín. Reakce probíhá rychleji při turbulentním obtékání.
- b) Fyzikální metody - principem těchto metod je sublimace, vypařování nebo rozpuštění povrchového nátěru obtékaného tělesa v proudící tekutině.
- c) Mechanické metody - principem těchto metod jsou mechanické děje, jako změna polohy nebo tvaru drobných částic umístěných na povrchu obtékaného tělesa.

Všeobecně se pomocí těchto metod získávají charakteristiky proudění na povrchu těles (u modelů a skutečných těles). Také jde zjistit těmito metodami místní směr proudění na povrchu těles, oblast laminárního a turbulentního obtékání a přechodové oblasti.[1]

4.1 Vizualizace proudění kapalin

Nejčastěji se tyto metody používají pro zjišťování charakteru proudění kapalin v blízkosti obtékaných povrchů. Často se používají různé nátěry. Kapaliny vyvolávají při proudění kolem objektu na jeho natřeném povrchu jisté změny, které lze pak pozorovat. Tyto změny mohou být vyvolané obecně chemickým, fyzikálním, nebo i mechanickým působením proudící kapaliny. Metody založené na chemických reakcích nejsou pro vizualizaci proudění kapalin běžně používány, protože používanou kapalinou je obvykle voda. Je velmi obtížné nalézt vyhovující látku, které by s vodou vstupovala do žádané reakce.[1,2]

4.1.1 Fyzikální metody pro vizualizaci proudění kapalin

U této metody se pro vizualizaci proudění kapalin v blízkosti povrchů obtékaných těles používají indikační nátěry. Indikační nátěry obsahují rozpouštědlo a jako základ se používají některé z následujících látek: acetoacetanilid, exalgin, acetanilid, fenacetin, hydrochinon diacetát, benzoin atd. Jako rozpouštědlo se nejčastěji používá aceton nebo lehké frakce petrolej při 4 až 5 procentní koncentraci indikační látky. Povrch tělesa se těmito látkami pokrývá suchým stříkáním pomocí stříkací pistole. Nastříkaná vrstva dosahuje tloušťky 5 až 12 mikrometrů. Tato vrstva musí být hladká, v žádném případě nesmí tvořit na povrchu tělesa jakékoli nerovnosti. Povrch obtékaného modelu musí mít tmavou barvu, nastříkaná vrstva má obvykle světlou barvu.[1]

Při turbulentním obtékání modelu se vrstva rozpouští rychleji než při obtékání laminárním. V důsledku toho je laminární oblast obtékání označena světlou barvou zbylé nastříkané indikační látky. V oblastech turbulentního obtékání převládá tmavá barva povrchu obtékaného modelu. Pro nalezení přechodové oblasti se nejlépe hodí 5 procentní roztok hydrochinon acetátu a s acetonem nebo 4 až 5 procentní roztok acetanilidu rozpuštěného ve směsi stejných objemů acetonu a petroleje. Místní nerovnosti povrchu obtékaného tělesa vyvolávají místní rozrušení proudu s úplavy, po kterých zůstávají v oblasti laminárního obtékání na povrchu obtékaného tělesa tmavé pruhy. Z těchto pruhů lze určit směr proudění na povrchu obtékaného tělesa.[1]

4.1.2 Mechanické metody pro vizualizaci proudění kapalin

Při mechanických metodách vizualizace proudění kapalin na povrchu obtékaných těles jsou způsoby úprav povrchů velmi jednoduché. Model se například natře silnou vrstvou olejové barvy. Barva se nenechá zaschnout a následně se model vloží do kapaliny. V nátěru se vytvoří jemné rýhy určující směr lokálního proudění v blízkosti povrchu modelu. Tímto způsobem lze určit i oblasti odtržení, protože rýhy v této oblasti mizí.[1]

Podobný je následující způsob, při němž se těleso před pokusem pokryje kapkami olejové barvy. Toto těleso se následně vloží do proudu kapaliny, který nezaschlé kapky rozmaže ve směru proudění. Kapky použité barvy musí mít vhodnou konsistenci, aby k jejich rozmazání nedošlo okamžitě. Takto vzniklé čáry na povrchu tělesa poskytují dobrou orientaci o proudění v blízkosti povrchu tělesa.[1]

V oblasti vizualizace proudění kapalin pomocí mechanických metod lze použít i úpravy obtékaných povrchů pomocí nitřových sond. Kdy se tyto sondy připevňují na povrch tělesa.[1]

4.2 Vizualizace proudění plynů

4.2.1 Chemické metody pro vizualizace proudění plynů

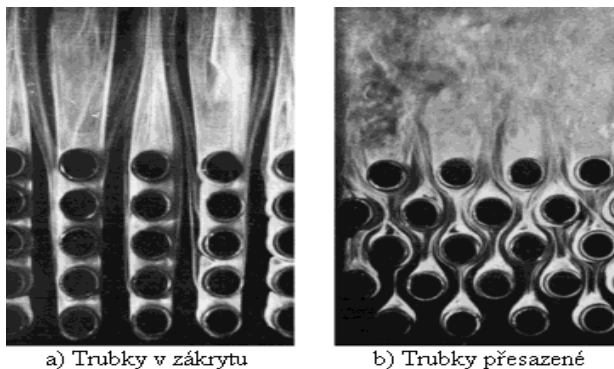
Charakter proudění plynů v blízkosti obtékaných povrchů a někdy také v úplavu za tělesem lze poměrně snadno zviditelnit pomocí různých úprav povrchů způsobujících chemické reakce s proudícím plynem. Díky těmto reakcím dochází buď ke změnám na samotném povrchu, nebo lze pozorovat proudění zplodin reakce v úplavu za tělesem.[2]

První popsána metoda je založena na reakci sloučeniny olova a sirovodíku. Obtékaný model je natřen nátěrem obsahujícím sloučeniny olova a otvorem v povrchu se do těsné blízkosti povrchu přivádí vlákno sirovodíku. Sirovodík vyvolává při styku s nátěrem zčernání. V místech turbulentního proudění sirovodík difunduje velmi rychle do okolí, v důsledku toho zde ke zčernání nedojde. Jinou možností je použít k nátěru chlorid rtuťnatý a přivádět do těsné blízkosti povrchu modelu vlákno čpavku. Nevýhodou této metody je skutečnost, že používané látky jsou zdravotně závadné. Tato popsána metoda je dobře použitelná ke studiu mezní vrstvy i při vyšších rychlostech.[1]

Při další popsané chemické metodě se povrch modelu polepí ozalidovým papírem (papír vhodný pro světlotisk) a pomocí tenkých trysek se před obtékaný model zavádí vlákna čpavku. Tato vlákna vyvolávají na ozalidovém papíře tmavé pruhy, které mají směr lokálního proudění na povrchu obtékaného modelu.[1]

Další popsaná chemická metoda využívá nátěru, který se skládá ze směsi jodidu draselného se škrobem. Do proudícího vzduchu se pak přimísí malé množství chloru, který reaguje s jodidem v povrchovém nátěru. Chlor reaguje s jodidem převážně v turbulentní oblasti obtékání, protože při turbulentním proudění je následkem intenzivnějšího promíchání styk chloru s povrchovým nátěrem častější než v oblasti laminárního proudění. V důsledku této reakce se změní barva povrchového nátěru. Nejčastěji se změní na purpurovou barvu. Metoda není vhodná pro práci v tunelu, jelikož chlor je zdraví škodlivý. Tuto metodu lze použít například za letu letadla. Letadlo s měřeným povrchem prolétává oblakem vzduchu, který je obohacen chlorem. Tento chlor může být vypouštěn například z jiného letadla, z továrního komínu nebo z trysek na zkoumaném letadle.[1]

Poslední popsanou chemickou metodou pro vizualizaci proudění plynů je metoda, která využívá reakci chlorovodíku s parami čpavku. Při této reakci vzniká bílá mlha chloridu amonného (salmiaku), a to dle rovnice $NH_3 + HCl \rightarrow NH_4Cl$. Tato bílá mlha se pak dostane do úplavu za objekt a umožní vizualizaci proudění v této oblasti. Příklad vizualizace proudění touto metodou v okolí svazků trubek tepelného výměníku je uveden na obr. 4-1. Pórovité povrchy trubek jsou namočené do chlorovodíku a svazek je ofukován vzduchem s parami čpavku. Vzniklá bílá mlha chloridu amonného zviditelňuje proudění za jednotlivými trubkami, ale i v jejich okolí, jelikož se tyto trubky nacházejí v úplavech předchozích trubek.[2]



Obr. 4-1 Vizualizace proudění v trubkovém výměníku tepla

4.2.2 Fyzikální metody pro vizualizace proudění plynů

4.2.2.1 Sublimační metody

Podstata této metody je, že se povrch obtékaného modelu natře vhodným sublimujícím materiálem. Tento materiál sublimuje silněji v oblasti turbulentní mezní vrstvy než v oblasti laminární mezní vrstvy. Základním požadavkem je, aby měl nátěr odlišnou barvu od barvy povrchu obtékaného modelu. Díky tomu lze zjistit linii přechodu, která se jeví jako rozhraní mezi povrchem bez nátěru (nátěrová látka vlivem sublimace přešla do proudícího prostředí) a povrchem s nátěrem. Pro nátěry lze použít hexachloreten, naftalen, difenyl, acenaften, hydrochinon, diethyleter, fluoren, kafr, borneol apod. Na povrch obtékaného modelu se tyto látky nanášejí suchým stříkáním nebo některé nátěrem v kapalném stavu za vyšších teplot. Při suchém stříkání je zapotřebí používat rozpouštědlo. Jako rozpouštědlo lze použít aceton, lehké frakce petroleje, benzen nebo xylen.[1]

Při experimentu pak dochází k postupné sublimaci povrchu a různá zabarvení označují oblasti s různou intenzitou turbulence. Příklad vizualizace proudění v okolí povrchu rotujícího disku pokrytého naftalenem je na obr. 4-2. Spirálové brázdy jsou způsobené intenzivnější sublimací naftalenu a jsou znakem přechodného režimu proudění v této části disku. Nerovnosti povrchu naftalenu jsou zvýrazněny počítačovým zpracováním obrazu, která zvýrazní brázdy, ale také nerovnoměrné osvětlení disku.[2]

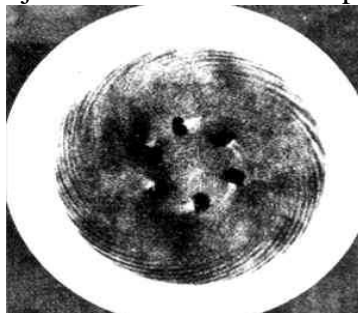


Obr. 4-2 Vizualizace proudění v okolí rotujícího disku pokrytého naftalenem[2]

4.2.2.2 Odpařovací metody

Dalšími fyzikálními metodami pro vizualizaci hranic přechodů jsou odpařovací metody. Dobré výsledky dává jednoduchý způsob, nazývaný metoda kaolinových nátěrů. Při této metodě se černě natřený povrch obtékaného modelu pokryje vrstvou kaolinu (například nastříkáním kaolinové suspenze). Vhodná suspenze se skládá ze 100 ml bezbarvého frigidenu, 100 ml butylacetátu, 100 ml butylalkoholu, 50 ml xylenu a 100 g kaolinu. Tato vrstva se nechá zaschnout a potom se obrousí vzniklé nerovnosti. Následně se tato vrstva postříká těkavou kapalinou (pro nízké rychlosti se používá nitrobenzen a pro vysoké nadzvukové rychlosti se používá ethylbenzoat, methylsalicilat a isosafrol). Tím se původní vrstva kaolinu, která měla původně matově bílou barvu, stane lesklou vrstvou. Takto připravený model se vloží do proudu plynu. Nastříkaná těkavá kapalina se začne odpařovat. V oblasti turbulentní mezní vrstvy se následkem intenzivního promíchání částic odpařuje mnohem rychleji než v laminární oblasti proudění. V důsledku toho se oblast povrchu, kde je proudění turbulentní, stane matnou, zatím co laminární oblast je pořád lesklá.[1]

Příklad aplikace metody kaolinových nátěrů je uveden na obr. 4-3. Jedná se o vizualizaci proudění v okolí povrchu rotujícího disku. Na obrázku jsou obdobné spirálové brázdy způsobené přechodným režimem proudění, jako na obr. 4-2. Na vnějším okraji disku je pak výrazně bílé zabarvení, což je znakem turbulentního proudění v této části.[2]



Obr. 4-3 Vizualizace proudění v okolí rotujícího disku pomocí odpařovací metody kaolinového nátěru[2]

Podobná je i další z odpařovacích metod, nazývaná metoda kapalinových vrstev. Tato metoda je jednodušší než metoda předchozí, ale její výsledky jsou méně kontrastní. Povrch obtékaného modelu se natře tenkou vrstvou těkavé kapaliny (nitrobenzen, ethylbenzoat, methylsalicilat, isosafrol). Tato kapalina se při obtékání tělesa odpařuje v turbulentní oblasti mnohem rychleji než v oblasti laminární. V důsledku toho se za hranicí přechodu kapalina za určitou dobu zcela odpaří. Výhodou této metody je, že vrstva kapaliny je tenká, a proto příliš neovlivňuje proudění.[1]

4.2.3 Mechanické metody pro vizualizace proudění plynů

Mezi vizualizační metody založené na mechanickém působení plynů na obtékané upravené povrchy patří především metoda nit'ových sond, metoda kapalinových filmů či nátěrů a metoda prášková.

4.2.3.1 Metoda nit'ových sond

Metoda nit'ových sond je často používaná metoda vizualizace proudění plynů. Tyto nit'ové sondy se připevňují na povrch obtékaných modelů. Běžně se tato metoda realizuje v atmosférických tunelech. Pro použití v těchto tunelech jsou nejvhodnější hedvábné nitě o délce asi 2 cm. Nitě jsou na jedné straně roztřepené a na druhé připevněné k povrchu modelu. Na základě orientace nití při proudění plynů lze určovat směry místních rychlostí na povrchu obtékaného modelu. Je rovněž možné z chování nití posuzovat charakter obtékání. Když jsou nitě v klidu, nacházejí se v laminární oblasti. Dochází-li k jemnému kmitání, jsou nitě v turbulentní mezní vrstvě. Pohybují-li se prudkým trhavým pohybem, jsou nitě v oblasti turbulentního odtržení. Metoda nit'ových sond se používá v tunelu, ale lze ji použít i na letadle za letu. Při této metodě je zapotřebí vzít v úvahu, že příslušná úprava povrchu ovlivňuje charakter proudění.[1]

4.2.3.2 Metoda kapalinových filmů

Mechanické metody vizualizace proudění plynů založené na nanášení kapalinových filmů a nátěrů jsou velmi rozmanité. U první popsané metodě se povrch obtékaného modelu opatří nátěrem tvořeným směsí petroleje a sazí. Při vložení tohoto modelu do proudění plynu se petrolej odpařuje a také odtéká ve směru proudění. Proudem petroleje jsou saze uspořádány ve směru proudění na povrchu. Touto velmi jednoduchou metodou lze určit přechodové oblasti i oblasti odtržení. Místo petroleje lze použít i některé oleje.[1]

U další metody se povrch obtékaného modelu potře olejem a silně se popráší jemným práškem (například práškovou sírou). Následně se model vloží do proudícího prostředí silně vlhkého vzduchu. U povrchu obtékaného modelu se tvoří sražené kapičky vody, které se usazují na tělese. Tyto kapičky vody tvoří na tělese vlivem okolního proudění řady, které mají směr lokálního proudění na povrchu obtékaného tělesa.[1]

U následující metody se model rovněž potře olejem. Toto těleso se potom vloží do proudícího plynu. Do proudícího plynu se následně stejnoměrně přimísí jemně rozemletá křída. Křída se bude usazovat na těch místech povrchu obtékaného tělesa, kde je intenzivní víření. Určí se tím oblast turbulentní mezní vrstvy i oblast turbulentního odtržení.[1]

U poslední metody se povrch obtékaného modelu natře olejem, který jeví fluorescenci v ultrafialovém záření. Při odtékání povrchu modelu je tloušťka vzniklého olejového filmu ovlivněna tečným napětím, které na povrch tělesa vyvolává obtékající vzduch. Tato změna tloušťky jde velmi dobře pozorovat v ultrafialovém záření. Místo na povrchu obtékaného tělesa, kde je větší tloušťka oleje, vydává intenzivnější světlo. Metoda je vhodná k vizualizaci oblasti laminárního i turbulentního obtékání, zpětného obtékání a odtržení proudu.[1]

Příklad vizualizace proudění vzduchu na vstupu do kanálu obdélníkového průřezu pomocí olejového nátěru boční stěny kanálu je uveden na obr. 4-4. Vzniklé kontury představují hranice proudu, ze kterých vidíme, že v důsledku nasávání vzduchu z okolního prostředí (ze všech směrů) se proud za vstupním průřezem kanálu nejdříve zužuje (vlevo) a pak teprve rozšiřuje do prostoru kanálu (vpravo).[2]



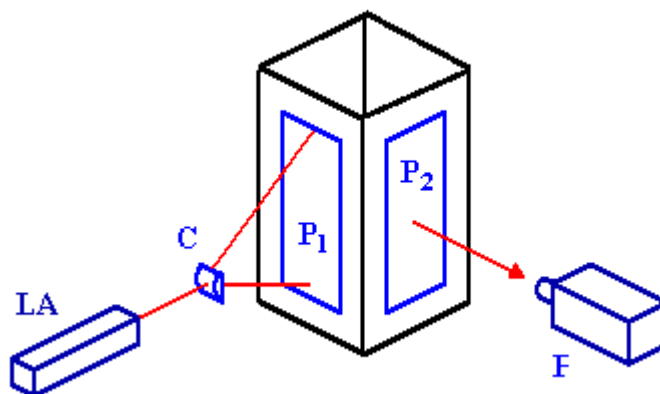
Obr. 4-4 Vizualizace proudu vzduchu na vstupu do plochého kanálu obdélníkového průřezu pomocí olejového nátěru boční stěny kanálu [2]

4.2.3.3 Metoda prášková

Pro vizualizaci proudění plynů v blízkosti obtékaných povrchů lze použít i samotný prášek. Pro vizualizaci se využívá např. lycopodium. Lycopodium se vysuší a pak se jím posype povrch modelu. Model byl předem odmaštěn, vyleštěn a opatřen tmavým nátěrem. Tento model se následně vloží do proudu vzduchu. Prášek zůstane lpět na povrchu obtékaného modelu v těch místech, kde rychlost vzduchu není dost vysoká. Prášek se tedy udrží v tlustší laminární mezní vrstvě a je odfouknut z náběžné hrany, kde je mezní vrstva turbulentní. Tato metoda jde použít do rychlosti 30 m/s.[1]

5 Experiment

Součástí této práce je i provedení jednoduchého experimentu vizualizace proudění pomocí výkonného laserového ukazovátka ve vodě. Cílem tohoto experimentu bylo vyfotografovat zviditelněné proudění vody v nádobě.



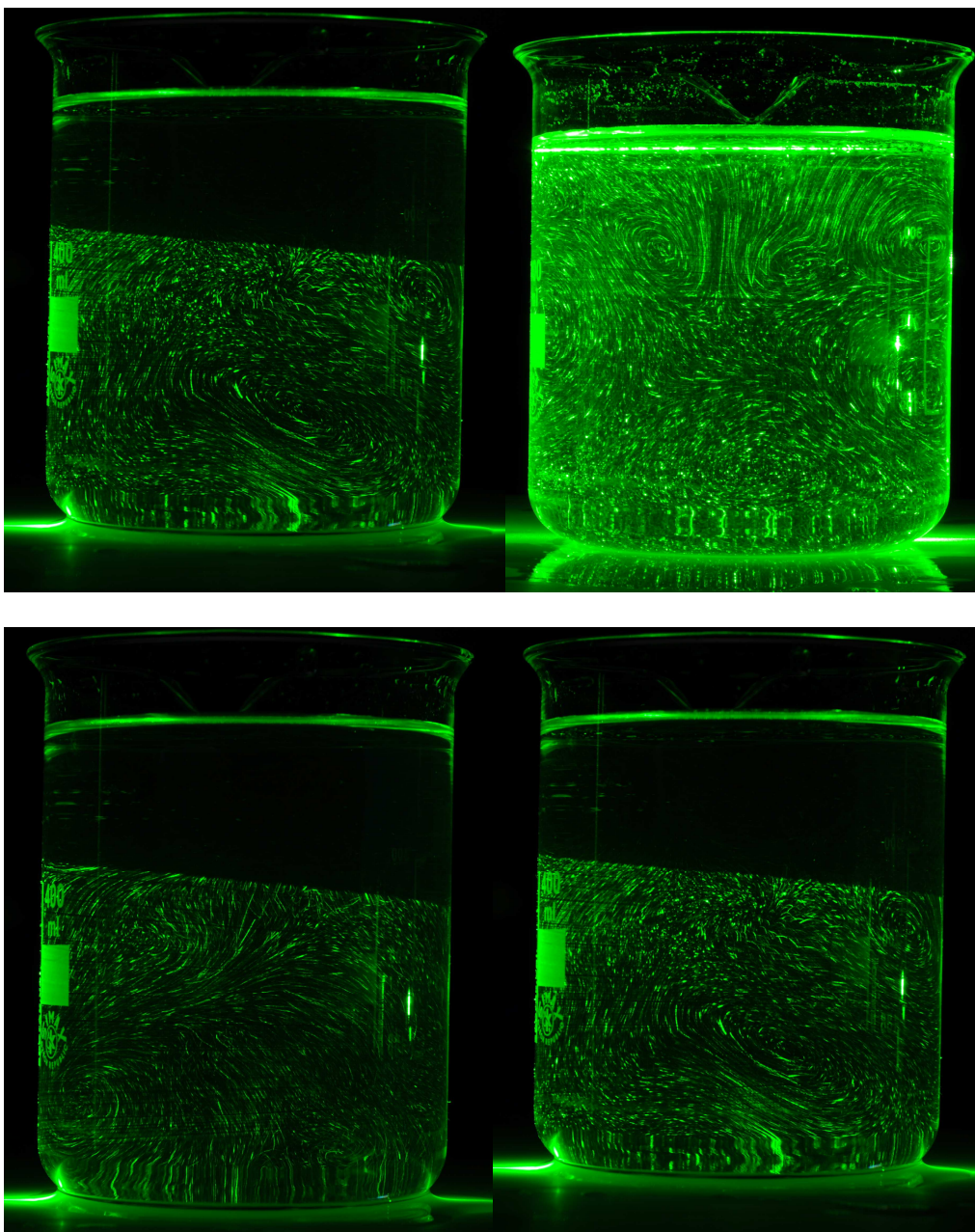
Obr. 5-1 Schéma uspořádání experimentu

Na obr. 5-1 je zobrazeno uspořádání experimentu pro vizualizaci proudění touto metodou. Experiment se skládá z osvětlovacího zařízení, kterým je v tomto případě laserové ukazovátka (LA), válcové čočky (C) a ze záznamového zařízení, kterým je fotoaparát (F). Osvětlovací zařízení a záznamové zařízení jsou umístěny u průzorů do prostoru s kapalinou. Kapalina je umístěna ve skleněné průhledné nádobě válcového tvaru. Pro vizualizaci proudění v nádobě je zapotřebí použít vizualizační částice, které se nasypou do kapaliny. Při vizualizaci proudění vytváří osvětlovací zařízení (LA) tzv. světelný nůž (světelnou rovinu či plochý svazek paprsků), který osvětlí jen vizualizační částice nacházející se ve zvoleném řezu (o definované tloušťce).

Pro vizualizaci proudění v nádobě byly použity malé polystyrenové částice o velikosti desetin milimetru. Polystyrenové částice byly nasypány do nádoby a důkladně promíchány, protože tyto částice se na začátku chovají jako nesmáčlivé. Proudění kapaliny se simulovalo mícháním vody v nádobě. Použité laserové ukazovátka bylo o výkonu 50mW. Použitá válcová čočka pro vytvoření světelné roviny byla speciální čočka z PIV aparatury. Pro tvorbu záznamu byl použit fotoaparát Nikon D90 s objektivy: 50mm F1.8 AF Nikkor D a 18-105mm F3.5-5.6 AF-S DX G ED VR. Fotoaparát byl umístěn na stativu a jeho optická osa byla nasměrovaná kolmo ke světelnému noži. Fotografování probíhalo v místnosti, kde byla vytvořena co největší tma. Fotoaparát byl umístěn asi třicet centimetrů od nádoby. Nejlepší výsledek byl při čase uzávěrky jedna sekunda. Na obr. 5-2 jsou fotky vyfotografované při popisovaném experimentu. Na těchto fotografiích jsou jasně zviditelněné trajektorie polystyrenových částic při proudění kapaliny prošlých za expoziční dobu. Kdybychom potřebovali, lze velmi lehce určit jejich rychlost. Z velikostí světelných stop polystyrenových částic a expoziční doby lze stanovit rychlost pohybu částice v daném místě kapaliny.

Na konec se pokusím o zhodnocení experimentu. Experiment je vcelku velmi jednoduchý. K jeho realizaci potřebujeme laserové ukazovátka, válcovou čočku, nádobu s vodou a nějaké částice pro vizualizaci. Jako válcovou čočku lze použít obyčejnou skleněnou tyčinku, která se používá například pro míchání směsi v chemických pokusech. Tuto tyčinku jsem nakonec nepoužil, protože jsem měl k dispozici speciální čočku z PIV aparatury. Použité částice byly polystyrenové, protože je to nejlevnější varianta vizualizačních částic.

Největším problémem u experimentu bylo zajistit, aby laserový paprsek dopadal na čočku ve správném úhlu. Nejprve jsem laser upevňoval pomocí různých úchyťů na stojánek a čočku držel před laserem. To se ukázalo jako velmi obtížný způsob, a proto se nakonec v dílně vyrobil přípravek, do kterého se uchytil laser i s čočkou. Další problém bylo stanovení optimální vzdálenosti od nádoby s kapalinou. Vzdálenost musí být taková, aby světelná rovina prosvěcovala celou nádobu s kapalinou. Použité laserové ukazovátko (o výkonu 50mW) mělo dostatečný výkon pro prosvícení odměrné nádoby střední velikosti, která byla použita u experimentu. Pro vizualizaci proudění ve větších nádobách (např. akvárií) je možnost použití spřažení více laserových ukazovátek a čoček. Na závěr bych řekl, že vizualizace pomocí laserového ukazovátko je jednoduchá a levná varianta PIV měření, ale je nutné vyřešit uchycení ukazovátko a čočky.



Obr. 5-2 Fotografie z experimentu

6 Závěr

V této práci jsem uvedl stručný přehled vizualizačních metod ve vodě i ve vzduchu. Dále jsem popsal základní pojmy související s prouděním plynů a tekutin. U uvedených metod jsem popsal jejich princip funkce. Z této práce vyplývá, že možnosti vizualizace jsou rozsáhlé a lze si vybrat metodu podle její náročnosti a způsobu proudění. Některé metody mají vysokou pořizovací cenu, jiné jsou poměrně levné. V současné době se nejvíce používají metody PIV, zviditelnění pomocí mlhy nebo dýmu, zavádění částic do tekutiny, zviditelnění pomocí barviva, zviditelnění pomocí vodíkových bublinek. Nejvíce z těchto metod se rozšiřuje metoda PIV, díky přesnému zviditelnění rychlostního pole v reálném čase pro velké rozpětí rychlostí proudění tekutiny (od nulových do nadzvukových rychlostí). Metoda PIV se uplatňuje ve všech oblastech, které se zabývají studiem proudění tekutin. Metoda zavádění částic do tekutiny se nejčastěji používá pro vizualizaci ve spojení s metodou PIV. Zviditelnění pomocí mlhy nebo dýmu je metoda používaná pro studium aerodynamiky automobilů a letadel. Zviditelnění pomocí barviva se aplikuje například pro vizualizaci vírů v kapalině. Zviditelnění pomocí vodíkových bublinek je vhodné pro studium vizualizace proudění v blízkosti povrchu obtékaných těles.

Metody vizualizace proudění jsou velmi přínosné pro studium proudění v jakýchkoli formách. Tyto vizualizační metody jsou velmi důležité pro průmysl, například studium proudění je nedílnou součástí při navrhování nových typů hydraulických zařízení, spalovacích prostorů, trysek nebo například částí letadel.

Na závěr chci zhodnotit použitelnost laserového ukazovátka pro vizualizaci proudění. Laserové ukazovátka o vyšším výkonu jde použít pro vizualizaci velmi dobře. Během experimentu nastaly některé problémy (uchycení laserového ukazovátka, nastavení válcové čočky a laserového ukazovátka), ale ty byly rychle odstraněny. Laserové ukazovátka jde použít velmi dobře jako levná náhrada PIV, ale poskytuje pouze kvalitativní informaci. Výsledky kvantitativní (tj. např. určení vektorů rychlostí) lze získat až po relativně složitém zpracování obrazové informace.

7 Seznam odborné literatury

[1] Řezníček, R. *Visualisace proudění*. Academia Praha. 1972

[2] Pavelek, M.; Janotková, E.; Štětina, J. *Vizualizační a optické měřicí metody*. [HTML dokument]. FSI VUT. Brno, 2001 [cit. 2011-03-01].
Dostupné z: <http://dt.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/>

[3] Lim, T.T. Flow Gallery [Online]. [cit. 2011-03-01]
Dostupné z: <http://serve.me.nus.edu.sg/limtt/>

[4] PIV měření [Online]. [cit. 2011-03-01]
Dostupné z: http://kke.zcu.cz/veda_a_vyzkum/laboratore/difuzor.html

[5] Particle image velocimetry - Wikipedia, the free encyclopedia [Online]. [cit. 2011-03-01]
Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_image_velocimetry

[6] Ježek, J.; Váradiová, B.; Adamec, J. *Mechanika tekutin*. ČVUT, Praha 2000.

[7] Janalík, J.; Šťáva, P. *Mechanika tekutin*. TU, Ostrava 2002.

[8] Základy hydrodynamiky [Online]. [cit. 2011-04-01] Dostupné z:
http://hydraulika.fsv.cvut.cz/users/matousek/downloads/web_HYA_03_Zaklady_hydrodynamiky_vm.pdf